

Etude du comportement de colonies de fissures courtes de Corrosion Sous Contrainte par Corrélation d'Images Numériques (DIC)

J. Bolivar¹, M. Frégonèse¹, J. Réthoré², C. Duret-Thual³, O. Calonne⁴, P. Combrade⁵, A. Proust⁶

¹INSA de Lyon, Université de Lyon, Laboratoire MATEIS UMR 5510, 21 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne cedex

²INSA de Lyon, Université de Lyon, LaMCoS UMR 5259, 27 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne cedex

³Institut de la Corrosion, ZA du Parc, Secteur Gampille, 42490 Fraisses

⁴AREVA NP, Centre Technique, 30 boulevard de l'industrie, 71200 Le Creusot

⁵ACXCOR, 63 chemin de l'Arnica, 42660 Le Bessat

⁶Mistras Group SA, 27 rue Magellan, 94370 Sucy en Brie

Résumé

Dans cette étude, un système expérimental est développé pour l'étude par corrélation d'images numériques (DIC) de colonies de fissures courtes de Corrosion Sous Contrainte (CSC). Un alliage d'Inconel 600 est étudié par DIC, puis par des techniques plus conventionnelles (émission acoustique, bruit électrochimique), dans une solution de tétrathionate de potassium à 0.01 M et acidifié à pH 3. Il a été aussi développé une méthode permettant d'identifier les fissures en fonction du temps, ainsi que la classification des fissures selon leur activité dynamique (actives ou dormantes). La même méthode a aussi permis le suivi du processus et l'identification de coalescences de fissures.

Introduction

La fissuration par Corrosion Sous Contrainte est un problème important de vieillissement pour les systèmes constitués de pièces métalliques sollicitées mécaniquement dans un environnement agressif. Les composants du circuit primaire d'une centrale nucléaire (où l'eau est présente sous pression et à haute température) présentent ce risque.

Actuellement, les modèles utilisés pour prédire le vieillissement de ces installations, purement empiriques, sont fondés sur des mesures de laboratoire du temps d'amorçage de la fissuration et des vitesses de propagation de fissures longues (sur éprouvettes entaillées) ; ils ne prennent pas en compte les étapes de croissance et de coalescence des fissures courtes qui peuvent occuper une part prépondérante de la durée de vie d'un composant. Par voie de conséquence, ils fournissent des estimations de durée de vie très « conservatives » et conduisent à des périodicités des opérations d'examens non destructifs non optimisées. Dans ce contexte, l'enjeu de ce travail est d'étudier les interactions mécaniques et électrochimiques entre fissures courtes de CSC dans les premiers stades de leur propagation. La première étape, consistant à obtenir des colonies de fissures représentatives et à étudier la faisabilité de l'étude de leur comportement par DIC, est présentée ici.

Méthodologie

La procédure expérimentale suivante a été développée avec le but principal d'obtenir des colonies de fissures représentatives de la Corrosion Sous Contrainte Intergranulaire (CSC-IG), présentant un fort caractère fragile et avec de bas niveaux de déformation.

Pour se faire, le chargement à force constante en dessous de la limite d'élasticité a été privilégié. Le chargement est effectué par une machine de traction électromécanique LOYD de capacité 30 kN.

Le matériau d'étude est l'alliage 600 (Tableau 1), sollicité dans une solution de tétrathionate de potassium de concentration 0.01 M et acidifiée à pH 3. La littérature montre que ce système conduit à un amorçage rapide de fissures de CSC intergranulaires, sous la forme de colonies de fissures représentatives du phénomène étudié ^[1]. Les éprouvettes sont traitées thermiquement (Tableau 2) afin de modifier leur degré de sensibilité vis-à-vis de la CSC et par conséquent la morphologie des colonies de fissures obtenues.

Tableau 1 : Composition de l'alliage d'étude

Alloy	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ti+Al	Cu	Co	S
INCONEL 600	Bal.	15.52	9.25	0.03	0.15	0.12	0.25	0.10	0.1	0.002

Tableau 2 : Description du traitement thermique

Traitement thermique	Description
MAS ($\sigma_Y = 263$ MPa)	Sensibilisation sous air à 600°C pendant 30 heures (<i>Mill Annealed and Sensitized</i>)

σ_Y = limite d'élasticité à 0,2%

La technique principale de caractérisation retenue pour l'étude est la corrélation d'images numériques (DIC). Cette technique permet l'obtention d'une cartographie de déplacements, par le suivi de l'évolution de caractéristiques uniques détectées en surface (mouchetis aléatoire). Grâce aux champs de déplacements obtenus, il est possible d'identifier la présence de fissures par mesure des sauts de déplacements dus aux discontinuités (apparition de fissures) et d'obtenir des paramètres tels que : la taille de la fissure, son ouverture, le facteur d'intensité des contraintes et le champ d'interaction ^[2].

Résultats et discussions

Comme il a été mentionné plus haut, cette procédure expérimentale cherche à étudier les interactions de colonies de fissures courtes issues de la Corrosion Sous Contrainte. La figure 1 montre la morphologie de fissures obtenues lors de ce type d'expériences.

Premièrement, on peut noter certains comportements atypiques, en comparaison avec une fissure isolée qui se propage dans les mêmes conditions (Figures 1.a et 1.c). Ce type de comportement représente bien les interactions entre fissures coexistant en une colonie de fissures, à savoir : coalescences, dormance et propagation irrégulière, qui font l'intérêt de ce projet.

D'autre part, autour des fissures obtenues, les déformations plastiques en pointe de fissure sont limitées (Figures 1.a et 1.c). De plus, des pourcentages de rupture intergranulaire assez importants sont obtenus. Par conséquent, la méthode est validée pour la suite de cette étude.

Par ailleurs, la figure 2 montre la détection de fissures par DIC au cours du temps. Cette détection est possible grâce à l'apparition de discontinuités (fissures), dans le champ de déplacement calculé par la DIC. La limite de détection se situe pour les fissures ayant une taille supérieure à 55µm (longueur) et 0.45µm d'ouverture, pour lesquelles la méthode montre une précision satisfaisante.

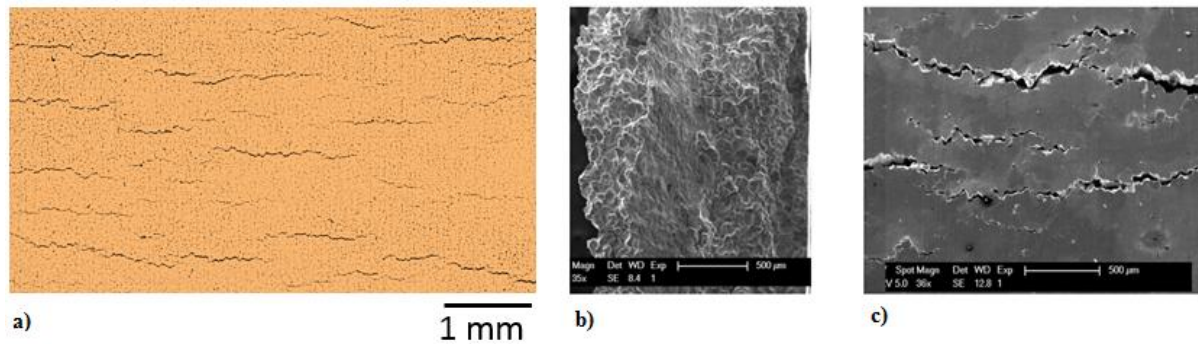


Figure 1 : Morphologie d'une colonie de fissure obtenue lors d'un essai de CSC à charge constante en milieu $K_2S_4O_6$ 0.01 M à pH 3. a) photo CCD de la colonie de fissures obtenue ; b) faciès de rupture et c) cliché MEB illustrant les interactions entre les fissures : coalescence et dormance

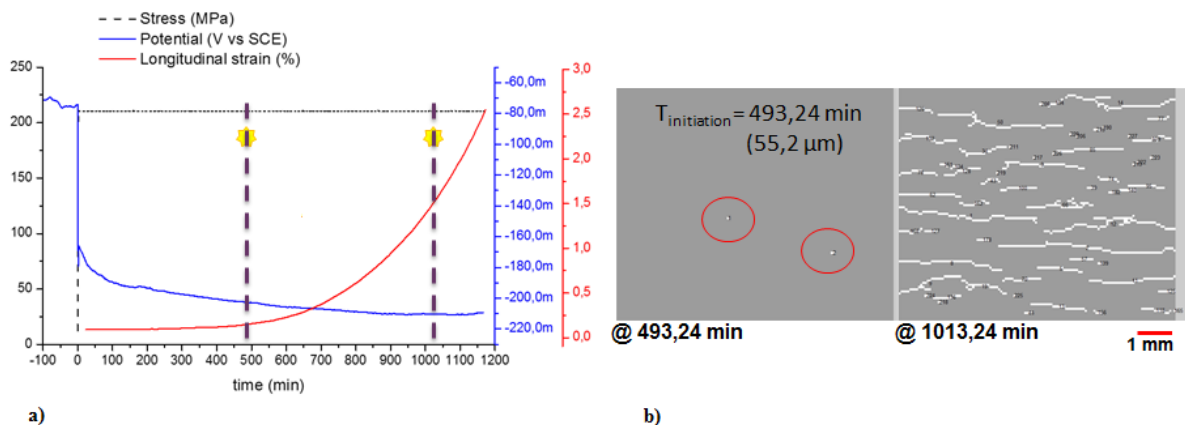


Figure 2 : Essai de CSC à charge constante en milieu $K_2S_4O_6$ 0.01 M à pH 3. a) suivi du potentiel d'abandon et de la déformation. b) détection de fissures

Une méthode a aussi été développée pour classifier les populations de fissures en fonction du temps, ainsi que pour l'identification individuelle de fissures et l'extraction de leurs paramètres (longueur, ouverture, vitesse, K_I ... entre autres). La figure 3 montre la classification issue de cette méthode pour un des essais réalisés. On peut observer que les différentes fissures ont été classifiées dans le temps selon leur état dynamique pour un instant « t ». Les différentes phases concernées sont :

- Fissures en étape d'amorçage : dont la longueur est égale à $55 \mu\text{m}$.
- Fissures actives : qui sont en train de se propager en surface (longueur) et/ou présentent des variations croissantes d'ouverture.
- Fissures dormantes : présentant une absence de variation de longueur et d'ouverture.
- Coalescences de fissures : rencontre physique de deux fissures, donnant la fusion de ces dernières.

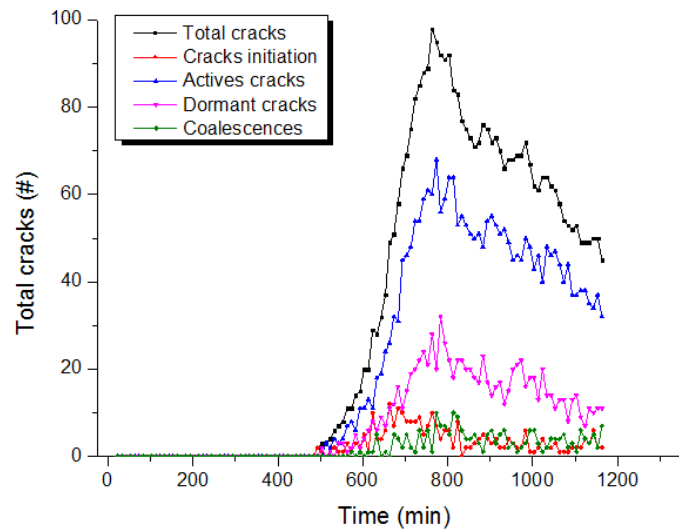


Figure 3 : Statistiques des populations de fissures obtenues lors de l'essai de CSC présenté sur la figure 2.

Par ailleurs, une autre expérience a été menée avec l'implémentation de deux autres techniques complémentaires de monitoring: l'Emission Acoustique (EA) et le Bruit Electrochimique (BE) (Figure 4). En ce qui concerne l'EA, il a été constaté que la principale activité acoustique se retrouve à la fin de l'essai (à partir de 1000 min), temps pour lequel les fissures se sont propagées de manière significative (Figure 4).

Cette absence de signaux acoustiques avant 1000 min peut s'expliquer par la prédominance d'un comportement actif de dissolution au cours de la propagation. En même temps, les données de BE en Courant (BEC) et en Potentiel (BEP) montrent un comportement très actif du matériau, caractéristique d'un processus de corrosion intergranulaire et/ou de la propagation active de fissures sans re-passivation. En outre, la première fissure a été détectée par DIC à environ 400 min, alors que le BEC montre un niveau assez élevé depuis 200 min. Ceci peut être dû à la nature très active de la surface, vis-à-vis de la corrosion intergranulaire et au seuil de détection des fissures dû à la résolution de la DIC.

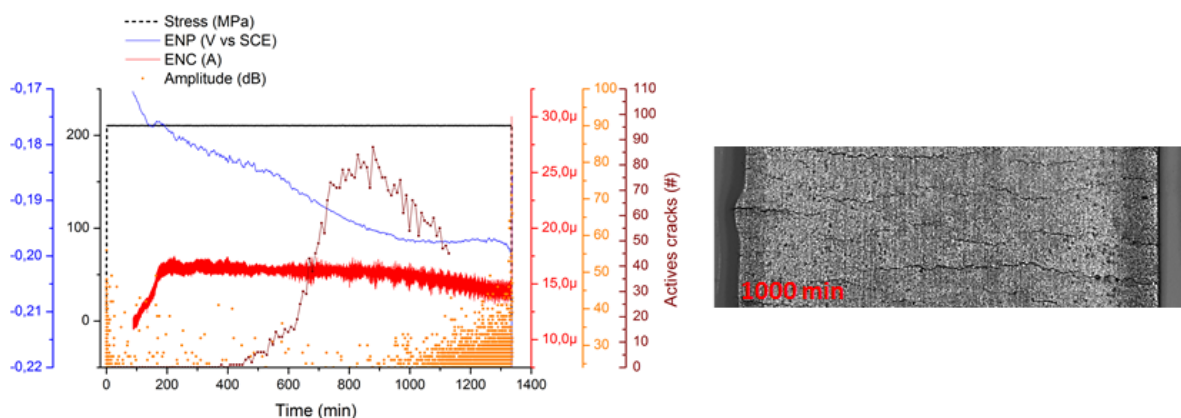


Figure 4 : Essai de CSC à charge constante suivi par DIC, BE et EA

Finalement, on peut observer que le suivi par BE peut fournir des informations très importantes pour l'étude des colonies de fissures courtes. Particulièrement en ce qui concerne l'état électrochimique des pointes de fissure, lesquelles jouent un rôle important dans le processus de propagation de fissures de CSC intergranulaire.

Conclusions

Ce travail a permis de valider la démarche expérimentale retenue pour l'étude du comportement de colonies de fissures courtes de CSC par DIC. De plus, une méthode de traitement des champs de déplacement a permis l'identification en fonction du temps de chacune des fissures, ainsi que l'extraction de tous leurs paramètres. Également, il a été possible de classifier les fissures selon leur état dynamique : actives ou dormantes, et de réaliser le suivi des coalescences au cours du temps.

En outre, le couplage de la DIC avec l'EA et le BE a montré une haute capacité de surveillance, surtout dans les phases où la DIC présente des lacunes : amorçage et rupture catastrophique. Finalement, il est envisagé d'utiliser les mesures réalisées par la DIC (2D) pour estimer les vitesses de propagation de fissures en profondeur (3D). Il est aussi prévu de transposer la démarche expérimentale à des essais réalisés à moyenne température et pression, plus représentatifs du milieu primaire, et d'étudier le comportement et les interactions des fissures dans ces conditions.

Ce projet bénéficie d'un financement par l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence ANR-12-RMNP-0020 (projet ECCOFIC).

Références

^[1] Was G. S., Rajan V., The mechanism of intergranular cracking of Ni-Cr-Fe alloys in sodium tetrathionate, *Metallurgical Transactions A*, volume 18, pages 1313-1323.

^[2] Hutt T., Cawley P., Feasibility of digital image correlation for detection of cracks at fastener holes, *NDT & E International*, volume 42, pages 141-149.